
Statische und dynamische Untersuchungen an unterschiedlichen Muskelgruppen von Leistungssportlern und Nachwuchsathleten mittels der ³¹Phosphor-Magnet-Resonanz-Spektroskopie

L. Brechtel, E. Hoff, R. Wolff

Humboldt-Universität zu Berlin

Institut für Sportwissenschaft, Abteilung Sportmedizin

1 Problem

Die Muskelfaserverteilung stellt einen wesentlichen leistungsdeterminierenden Faktor in vielen Sportarten dar, gilt als weitgehend genetisch festgelegt und scheint nur bedingt durch Trainingsfaktoren beeinflussbar zu sein. Der Fasertyp kann histochemisch auf Grundlage der Aktomyosin-ATPase-Aktivität, der Querschnittsfläche und der Zusammensetzung der schweren Myosin-Ketten (Haupttypisierung Typ I oder II) und leichten Ketten (Subtypisierung) sowie der SDH-Aktivität bestimmt werden [z.B. 3, 10, 11, 12]. Einige Publikationen mit oftmals jedoch nur kleiner Untersuchungsanzahl belegen, dass durch die ³¹Phosphor-Magnet-Resonanz-Spektroskopie (31P-MRS) der unterschiedliche Phosphatgehalt im Muskel differenziert und dadurch auf die Faserzusammensetzung des Muskels geschlossen werden kann [1, 2, 5, 7, 17, 18]. Es wurden signifikante Korrelationen zwischen Typ II-Fasern und dem Verhältnis von Phosphocreatin (PCr) zu ATP, anorganischem Phosphat (Pi) zu ATP und (PCr + Pi) zu ATP gefunden, während keine Korrelation zwischen Faserzusammensetzung und pH oder T₂-Zeit bestehen sollen [15]. Zum Verhältnis PCr/Pi sind die Angaben widersprüchlich. TAKAHASHI findet keine Korrelation, VANDENBORNE weist darauf hin, dass das PCr/Pi-Verhältnis des *Soleus*, ein Muskel mit vorwiegend ST-Fasern, kleiner sei als das des medialen und lateralen *Gastrocnemius*, Muskeln mit gemischter Faserstruktur [17, 18].

Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Einfluss von Belastung, Ermüdung und Erholung auf den Phosphatstoffwechsel. Unter Ausbelastung fällt der PCr/Pi-Quotient ab [19], wobei ein metabolisches Limit bei 0,6 erreicht wird. Der pH-Wert fällt unter 6,75-6,85. VANDENBORNE findet bei maximaler Arbeit (schnelle Plantarflexionen) einen 84%igen Abfall des PCr-Pools und einen achtfachen Anstieg des Pi. Am Ende der ersten Arbeitsminute treten drei bzw. zwei getrennte Pi-Peaks mit unterschiedlichen relativen Flächen reproduzierbar auf. Auch diese multiplen Pi-Peaks sollen eine Differenzierung der unterschiedlichen Muskelfasertypen zulassen [16]. In Ruhe wurde ein Zurückschwingen des Pi-Pools beobachtet. Das Auftreten und Verschwinden von Pi-Peaks

wird in Zusammenhang mit pH-Veränderungen gebracht, wobei das Auftreten von zwei Pi-Peaks eine Dissoziation von intra- und extrazellulärem pH-Wert bzw. das metabolische Verhalten unterschiedlicher Fasertypen widerspiegeln soll. Letzteres wird auch durch Befunde von SHEN u.a. (1996) gestützt, welche mittels ^1H -Spektroskopie zwei Laktatpeaks (Doublette) im ermüdeten Muskel beobachteten, die den unterschiedlichen Beitrag der oxidativen und glykolytischen Muskelfasern repräsentieren [14]. PARK weist nach, dass auf niedrigerem Arbeitsniveau vorwiegend Typ I-Fasern mit geringer Laktatproduktion, bei Ausbelastung Typ IIB-Fasern (mit Auftreten von mehreren hohen Pi-Peaks) angesprochen werden [8]. Beim Vergleich zwischen Sprintern und Langstrecklern weisen letztere ein niedrigeres PCr/Pi- und PCr/Pt-Verhältnis sowie eine höhere Pi/Pt-Relation im *M. quadriceps* auf. Sprinter hatten hingegen höhere PCr-Werte, PDE/Pt- und PCr/ATP-Ratios sowie niedrigere Pi-Konzentrationen ($\text{Pt} = \text{PCr} + \text{Pi} + \text{PDE} + 3\text{xATP}$; PDE = Phosphordiester; [1, 2]).

Aufgrund der obigen Ausführungen könnten spektroskopische Untersuchungen zur Faserspektrumverteilung und zu metabolischen Adaptationsmechanismen durch Training aufgrund der nichtinvasiven und nebenwirkungsfreien Methode, welche repetitive Untersuchungen ermöglicht, in der Talentauswahl, Wahl der Trainingsformen und Überprüfung derselben für Patienten und Hochleistungssportler eine wichtige praxisrelevante Rolle einnehmen und möglicherweise die invasive und ethisch umstrittene Methode der Muskelbiopsie bei gesunden und minderjährigen Probanden ersetzen. Aus dem Gesamtprojekt werden hier beispielhaft eine Längsschnittuntersuchung mit der Fragestellung nach entwicklungsbedingten Veränderungen sowie eine Kraftausdauerbelastung von leichtathletischen Kurz sprintern dargestellt.

2 Methoden

Zehn Nachwuchs-Eisschnellläufer wurden in einem sechsjährigen Längsschnitt mittels ^{31}P -MRS und weiteren leistungsdiagnostischen Verfahren untersucht (Alter zum Zeitpunkt U1: 12-13 Jahre). Die vier leichtathletischen Sprinter repräsentierten zum Untersuchungszeitpunkt die aktuelle deutsche Spitze. Die Untersuchungen der Probanden wurden nach einer ausführlichen mündlichen und schriftlichen Aufklärung und soweit erforderlich im Beisein mit schriftlichem Einverständnis der Eltern durchgeführt. Eine Medikation bzw. Supplementation mit Kreatinpräparaten wurde anamnestisch ausgeschlossen.

Magnetresonanztomographische Methoden

Die Untersuchungen erfolgten für die Eisschnellläufer auf einem 1,5 Tesla-Ganzkörper-scanner Magnetom SP 63, die der Sprinter auf einem Ganzkörper-scanner Vision (jeweils Fa. Siemens, Erlangen) bei vergleichbaren Sequenzparametern. Der Proband wird zur Untersuchung jeweils im Ganzkörper-scanner so gelagert, dass die Lokalisation der Oberflächenspule auf dem Muskelbauch des *M. vastus medialis* und des *M. gastrocnemius medialis* für eine optimale Sensitivität in 2,5 cm Tiefe des zu untersuchenden Muskels erfolgt. Bezüglich der Untersuchungstechniken wird auf die Publikationen der eigenen Arbeitsgruppe verwiesen [6, 20]. Die Post-recording-Auswertung erfolgte mit der Software Igor Pro 3.01 for Power Macintosh, Wave Metrics Inc., Lake Oswego, OR, USA [6, 9, 13, 20].

Für die Sprinter erfolgte eine fünfminütige lokale Belastung der Wadenmuskulatur auf einem selbstgebauten MR-fähigem Ergometer bei 30% der vorab isometrisch ermittelten Maximalkraft. Die Belastungsspektren für den *M. gastrocnemius* wurden mit einer zeitlichen Auflösung von 30 s (15 Aquisitionen) bis zur zehnten Nachbelastungsminute erfasst.

Leistungsdiagnostische Methoden zur Charakterisierung der Eisschnellläufer

Es wurden die maximale zyklische Schnelligkeit, zyklische Schnelligkeitsausdauer, vertikale Sprungkraft, Reagibilität, Reaktionszeiten und Schnelligkeit (Bodenkontaktzeit) mittels des Talent-Diagnose-Systems (WERTHNER, Österreich) erfasst. In einem Abstand von wenigen Tagen zur 31P-MRS erfolgten ein Fahrradstufentest (BAL-Schema), ein 10 s-Maximaltest und ein Wingate-Test (Newton ErgoLab, Fa. Lode, Niederlande). Der 10 s-Maximaltest ist ein Test für die alaktatizide anaerobe Kapazität und gilt als indirekter Prediktor der Sprintleistungsfähigkeit im Eisschnelllauf. Der Wingate-Test (30 s-Test) ist ein Test für die laktatizide anaerobe Kapazität. Als Parameter wurden jeweils absolute und relative Leistung, die relative VO_2 peak (Oxycon beta, Fa. Njinhardt, Niederlande) und die maximale Laktatkonzentration bestimmt. Anhand der Bestenlisten der Deutschen Eisschnelllauf-Gemeinschaft und nach Trainereinschätzung erfolgte eine nachfolgende Unterscheidung der Athleten nach Wettkampferfolg bzw. Drop out sowie als Sprint- oder Ausdauerathlet.

Statistik

An statistischen Verfahren wurden der Mann-Whitney-U-Test, der Wilcoxon-Test und eine MANOVA mit Messwiederholung angewandt (Statistica für Windows, StatSoft Inc., 1999, TULSA, OK, USA). Dargestellt werden jeweils Median und Quartile. Das Signifikanzniveau wurde bei einem $p < 0,05$ festgelegt.

3 Ergebnisse

Längsschnittuntersuchung an Eisschnellläufern

Zum Zeitpunkt der Nachuntersuchung waren vier Athleten Mitglied der Junioren-Nationalmannschaft. Drei Athleten hatten ein Leistungsniveau der Regionalebene, wobei zwei Athleten nur knapp die Aufnahme in den National-Kader verpassten. Drei Athleten waren Drop Outs. Anhand der Wettkampfanamnese konnten somit sechs erfolgreiche Athleten von vier erfolglosen Athleten unterschieden werden. Des Weiteren wurden vier Sprinter und sechs Ausdauerathleten identifiziert. Innerhalb der sechs Jahre war ein signifikanter Anstieg der fahrradergometrischen Leistungsfähigkeit im Stufentest von 3,4 auf 4,2 Watt/kg KG ($p < 0,01$) sowie nicht signifikant der VO_2 peak zu verzeichnen. Gruppenunterschiede zwischen erfolgreichen und erfolglosen Athleten bestanden numerisch, waren statistisch jedoch nicht signifikant ausgeprägt. Dies traf auch für die absolute und durchschnittlich relative Leistungsfähigkeit im 10 s- und Wingate-Test zu. Beispielhaft für die Entwicklung der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit stagnierte die 500-m-Sprint-Leistung bei den erfolglosen Athleten (Zuwachs 5,3%), während die erfolgreicheren Sportler sich um durchschnittlich 13,7% signifikant verbesserten. Bezüglich der weiteren sportmotorischen Tests war nur bezüglich der Reaktions-schnelligkeit ein signifikanter Unterschied zu registrieren. Erfolgreiche Sportler wiesen kürzere Reaktionszeiten auf ($p < 0,01$). Sowohl zyklische Schnelligkeit und Schnelligkeitsausdauer als auch Reagibilität verhielten sich indifferent.

Während für den *M. gastrocnemius* ein stabiler Verlauf des PCr/Pi-Verhältnisses beobachtet wurde, fand sich für den *M. quadriceps* ein Anstieg. Erfolgreiche Athleten wiesen für beide Muskelgruppen bei vergleichbaren Ausgangsdaten zum zweiten Untersuchungszeitpunkt höhere PCr/Pi-Verhältnisse als erfolgreiche Sportler auf. Auch konnten höhere PCr/Pi-Werte bei Sprintern beobachtet werden. Diese Ergebnisse waren jedoch nur zum Teil signifikant ausgeprägt und wiesen eine große Streubreite auf. Bei Betrachtung der individuellen Verläufe war überwiegend jedoch ein Anstieg bei Sprintern und erfolglosen Athleten zu beobachten. PCr/Pi des Quadriceps korrelierte mit der maximalen zyklischen Schnelligkeit zu U2 ($r = 0,64$; $p < 0,05$). Für das Verhältnis PCr/ β -ATP konnte ein Anstieg zwischen den beiden Untersuchungszeiträumen diagnostiziert werden. Dieser war deutlich ausgeprägter für den *M. quadriceps* ($p < 0,01$) und korrelierte negativ mit dem Zuwachs der maximalen Sauerstoffaufnahme im fahrradergometrischen Stufentest ($r = -0,77$; $p < 0,05$). Der individuelle Anstieg des Quotienten verhielt sich für den *M. quadriceps* jedoch deutlich gleichsinniger als für den *M. gastrocnemius*.

Submaximale Belastungsuntersuchung an Sprintern

Während der fünfminütigen lokalen Belastung der Wadenmuskulatur bei 30% der vorab isometrisch ermittelten Maximalkraft blieb der pH-Wert des *M. gastrocnemius* gegenüber dem Ruhewert konstant. Die prozentualen Veränderungen zeigen für den PCr-Pool einen Abfall um 30%, wobei auch bis zur zehnten Nachbelastungsminute die Ausgangswerte noch nicht wieder erreicht wurden. Für Pi ergab sich ein biphasischer Verlauf mit einem Anstieg unter Belastung und einem Abfall in der Nachbelastungsphase (Abb. 1).

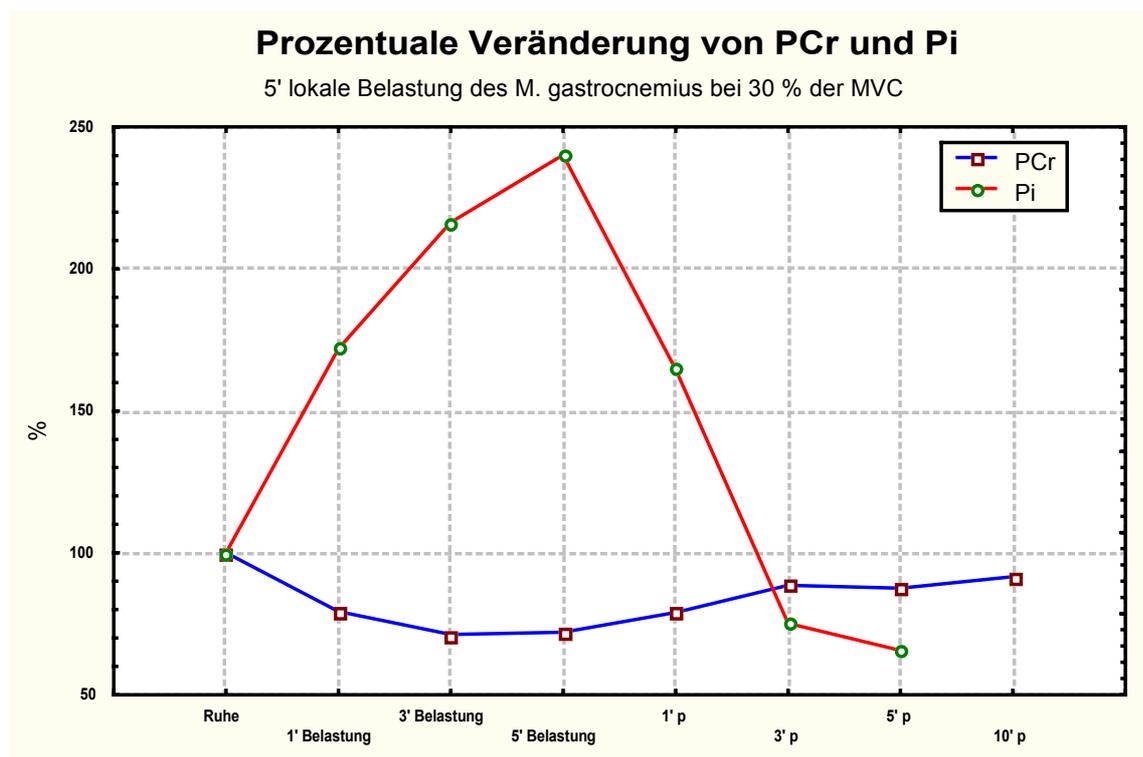


Abb. 1: Prozentuale Veränderungen von PCr und Pi im Vergleich zu den Ruhewerten bei einer fünfminütigen submaximalen Belastung des *M. gastrocnemius*

4 Diskussion

Längsschnittuntersuchung an Eisschnellläufern

Der innerhalb des Untersuchungszeitraumes festgestellte Anstieg der fahrradergometrischen Leistungsfähigkeit wies keine Gruppenunterschiede zwischen erfolgreichen und erfolglosen Athleten auf. Dies traf auch für die absolute und durchschnittliche relative Leistungsfähigkeit im 10 s- und Wingate-Test sowie für die zyklische Schnelligkeit, Schnelligkeitsausdauer und Reagibilität zu. Unterschiede wurden jedoch in der Entwicklung der wettkampfspezifischen Sprintleistungsfähigkeit und Reaktionsschnelligkeit gefunden.

Diese differierenden Befunde sind wahrscheinlich einerseits auf die für den Eisschnelllauf unspezifischen Testverfahren, andererseits auch auf den noch nicht lange zurückliegenden Drop Out der schlechteren Athleten zurückzuführen.

Das Verhältnis PCr zu Pi unter Ruhebedingungen verhielt sich für den *M. gastrocnemius* in der Gesamtgruppe unverändert. Dieser jedoch nur im Mittel stabile Verlauf differierte jedoch wie der auch eher uncharakteristische, wohl entwicklungsbedingte Anstieg im *M. quadriceps* zwischen erfolglosen und erfolgreichen Athleten sowie zwischen Sprintern und Ausdauerathleten. Bei Betrachtung der individuellen Verläufe war überwiegend jedoch ein Anstieg bei Sprintern und erfolglosen Athleten zu beobachten. Der zum zweiten Untersuchungszeitpunkt festgestellte Unterschied ist möglicherweise Folge des forcierten Ausdauertrainings, welchem sich insbesondere die erfolgreicheren Athleten unterziehen mussten, um die Aufnahmekriterien der Deutschen Eisschnelllauf-Gemeinschaft zu erfüllen. Dieser Befund könnte Hinweis auf eine durch Ausdauertraining induzierte Verschiebung des Faserspektrums in Richtung ST-Fasern sein. Inwieweit insbesondere die Förderung des Vierkampfes sich hierbei ursächlich negativ zuungunsten der FT-Fasern auswirkt, kann derzeit nur vermutet werden, da eine Kontrolle der Trainingsparameter retrospektiv über sechs Jahre nicht mehr durchgeführt werden konnte. Schlussfolgernd mag ein forciertes Ausdauertraining zur Erfüllung der Vierkampfnormen eine Verschiebung Richtung ST-Fasern bei eigentlich eher Sprint- und Mittelstreckentalenten bewirkt haben, während für die Sprintdisziplinen geeignete Athleten aufgrund der nicht erfüllten Normen zu Drop Outs wurden.

Die Korrelation zwischen dem Verhältnis PCr/Pi und der maximalen zyklischen Schnelligkeit deutet darauf hin, dass PCr/Pi zumindest teilweise die aktuellen Schnelligkeitsparameter repräsentiert. Diese Befunde befinden sich im Einklang mit der Literatur. So wiesen z.B. BOICELLI et al. und VANDENBORNE et al. eine größere PCr/Pi-Ratio bei Sprintern im Vergleich zu Langstreckenläufern nach [2, 17, 18].

Für das Verhältnis PCr/ β -ATP unter Ruhebedingungen konnte ein Anstieg zwischen den beiden Untersuchungszeiträumen diagnostiziert werden. Dieser war deutlich ausgeprägter für den *M. quadriceps* und korrelierte negativ mit dem Zuwachs der maximalen Sauerstoffaufnahme im fahrradergometrischen Stufentest. Der Anstieg des Quotienten verhielt sich für den *M. gastrocnemius* jedoch individuell deutlich unterschiedlicher im Gegensatz zum interindividuell vergleichbaren Anstieg im *M. quadriceps*.

Aufgrund der bzgl. der Rangfolge gleichgerichteten Veränderungen scheint derzeit nur das Verhältnis PCr/ β -ATP im *M. quadriceps v. medialis* für eine Voraussage der zukünftigen Faserzusammensetzung geeignet. Hierbei kann eine hohe PCr/ β -ATP-Ratio in Muskeln mit großen Muskelvolumina auf eine geringere Trainierbarkeit der maximalen aeroben

Leistungsfähigkeit hinweisen ($\Delta \text{VO}_2\text{peak}$ vs. $\text{PCr}/\beta\text{-ATP}$ des *M. quadriceps*: $r = -0,77$; $p < 0,05$). Des Weiteren deutet die Korrelation zwischen dem 10 s-Test und der PCr/Pi -Ratio ($r = 0,70$; $p < 0,05$) darauf hin, dass ein entwicklungsbedingter PCr/Pi -Anstieg die alaktazide anaerobe Kapazität erhöht.

Die individuell unterschiedlichen Veränderungen des PCr/Pi - und $\text{PCr}/\beta\text{-ATP}$ -Verhältnis im *M. gastrocnemius* kann die Folge individuellerer Adaptationen des Gastrocnemius auf die dynamischere Bewegung bei Verlassen des Eises im Gegensatz zu den vermehrt statischen Anteilen in der Oberschenkelbewegung sein. Inwieweit Unterschiede in den Adaptationsmöglichkeiten einzelner Muskelgruppen auf Trainingseinflüsse in der Pubertät zurückzuführen sind, ist derzeit nur spekulativ, da hierzu bisher keine Untersuchungen vorliegen. Als hypothetische Ursache muss auch ein Einfluss des im Untersuchungszeitraum eingeführten Klappschlittschuh diskutiert werden, welcher möglicherweise die Adaptation des Gastrocnemius aufgrund der andersartigen Bewegungsausführungen individueller veränderte. Andere Autoren wiesen bereits eine erhöhte mechanische Leistungsabgabe und Effizienz sowie höhere maximale Blutlaktatkonzentrationen im Gegensatz zu den herkömmlichen Schlittschuhen nach [4].

Submaximale Belastungsuntersuchung an Sprintern

Der Abfall von PCr und Anstieg von Pi weist auf eine Limitierung der energieliefernden Prozesse auch bei einer ausdauerorientierten submaximalen Belastung hin. Da diese Veränderungen bereits in der ersten Belastungsminute bestehen und bis zur zehnten Nachbelastungsminute andauern, können sich sowohl für repetitive Trainingsbelastungen als auch für das Aufwärmen vor Wettkämpfen praxisrelevante Konsequenzen ergeben. Insbesondere die noch nicht wieder erfolgte Wiederherstellung des PCr -Pools in der zehnten Nachbelastungsminute lässt die Schlussfolgerung zu, dass selbst nach niedrig intensiven Belastungen die Zeit für eine Ruhephase zwischen Beendigung des Aufwärmens und erneuter Belastung bzw. Wettkampfstart mindestens zehn Minuten betragen sollte. Der Abfall von Pi in der Nachbelastungsphase ist ein typisches Phänomen, welches sich unter anderem mit einer Bindung von Pi an mitochondriale Membranen interpretieren lässt.

5 Literatur

1. BERNÚS, G.; GONZALEZ de SUSO, J.M.; ALONSO, J.; MARTIN, P.A.; PRAT, J.A.; ARUS, C.: ^{31}P -MRS of quadriceps reveals quantitative differences between sprinters and long-distance runners [see comments]. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25 (1993) 4, 479-484.

2. BOICELLI, C.A.; BALDASSARRI, A.M.; BORSETTO, C.; CONCONI, F.: An approach to noninvasive fiber type determination by NMR. *Int. J. Sports Med.* (1989) 10, 53-54.
3. GOLLNICK, P.D.; ARMSTRONG, R.B.; SEMBROWICH, W.L.; SHEPHERD, R.E.; SALTIN, B.: Glycogen depletion pattern in human skeletal muscle fibers after heavy exercise. *J. Appl. Physiol.* 34 (1973), 615-618.
4. HOUDIJK, H.; HEIJNSDIJK, E.A.; de KONING, J.J.; de GROOT, G.; BOBBERT, M.F.: Physiological responses that account for the increased power output in speed skating using klapskates. *Eur. J. Appl. Physiol.* 83 (2000) 4/5, 283-288.
5. KUSHMERICK, M.J.; MOERLAND, T.S.; WISEMAN, R.W.: Mammalian skeletal muscle fibers distinguished by contents of phosphocreatine, ATP, and Pi. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 89 (1992), 7521-7525.
6. MÄURER, J.; KONSTANCZAK, P.; SÖLLNER, O.; EHRENSTEIN, T.; KNOLLMANN, F.; WOLFF, R.; VOGL, T.J.; FELIX, R.: Muscle metabolism of professional athletes using ³¹P-spectroscopy. *Acta Radiologica* 40 (1999), 73-77.
7. MEYER, R.A.; BROWN, T.R.; KUSHMERICK, M.J.: Phosphorus nuclear magnetic resonance of fast- and slow-twitch muscle. *Am. J. Physiol.* 248 (Cell Physiol 17) (1985) C 279-287.
8. PARK, J.H.; BROWN, R.L.; PARK, C.R.; McCULLY, K.; COHN, M.; HASELGROVE, J.; CHANCE, B.: Functional pools of oxidative and glycolytic fibers in human muscle observed by ³¹P magnetic resonance spectroscopy during exercise. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 84 (1997) 24, 8976-8980.
9. PRESS, W.H.; TEUKOLSKY, A.; VETTERING, W.T.; FLANNERY, B.P.: *Numerical recipes in Fortran*. Cambridge 1992²
10. SALTIN, B.; ESSEN, B.: Muscle glycogen, lactate, ATP and CP in intermittent exercise. In: PERNOW, B.; SALTIN, B. (eds): *Muscle metabolism during exercise*. New York 1971, 419-424.
11. SALTIN, B.; HENRIKSSON, J.; NYGAARD, E.; ANDERSEN, P.: Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 301 (1977), 3-29.
12. SALTIN, B.; GOLLNICK, P.D.: Skeletal muscle adaptability: significance for metabolism and performance. In: *Handbook of Physiology. Skeletal muscle*, Section 10, American Physiological Society, Bethesda 1983, 556-631.
13. SHAW, D.: *Studies in physical and theoretical chemistry. Fourier transformed NMR spectroscopy*. New York 1984²
14. SHEN, D.; GREGORY, C.D.; DAWSON, M.J.: Observation and quantitation of lactate in oxidative and glycolytic fibers of skeletal muscles. *Magn. Reson. Med.* 36 (1996) 1, 30-38.
15. TAKAHASHI, H.; KUNO, S.; KATSUTA, S.; SHIMOJO, H.; MASUDA, K.; YOSHIOKA, H.; ANNO, I.; ITAI, Y.: Relationship between fibre composition and NMR measurements in human skeletal muscle. *NMR in Biomed.* (1996) 9, 8-12.

16. VANDENBORNE, K.; McCULLY, K.; KAKIHIRA, H.; PRAMMER, M.; BOLINGER, L.; DETRE, J.A.; De MEIRLIER, K.; WALTER, G.; CHANCE, B.; LEIGH, J.S.: Metabolic heterogeneity in human calf muscle during maximal exercise. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 88 (1991) 13, 5714-5718.
17. VANDENBORNE, K.; WALTER, G.; GOELMANN, G.; PLONTZ, L.; DUCHLEY, G.; LEIGH, J.S.: Phosphate content in fast and slow twitch muscles. SMRM (1993), 1140.
18. VANDENBORNE, K.; WALTER, G.; LEIGH, J.S.; GOELMAN, G.: Energy rich phosphates in human muscles with different fiber type mixtures. SMRM (1993), 2706.
19. VESTERGAARD-POULSEN, P.; THOMSEN, C.; SINKJAER, T.; HENRIKSEN, O.: Simultaneous ³¹P-NMR spectroscopy and EMG in exercising and recovering human skeletal muscle: a correlation study. J. Appl. Physiol. 79 (1995) 5, 1469-1478.
20. WOLFF, R.; MÄURER, J.: Die Bestimmung der Muskelfaserverteilung (Typ I, II) mit Hilfe der Kernspinspektroskopie – Erste Ergebnisse. In: STARISCHKA, S.; CARL, K.; KRUG, J. (Hrsg.): Schwerpunktthema Nachwuchstraining. Erlangen 1996.

